Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

50X1-HUM

Page Denied

Next 50 Page(s) In Document Denied

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК СССР. ОТН
МЕХАНИКА И МАШИНОСТРОЕНИЕ

№ 3 1963

(FLOW OF ELECTRO CONDUCTIVE GASES AT A REGULAR RATE IN A CHANNEL OF AN MHD GENERATOR)

ТЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОПРОВОДНОГО ГАЗА С ПОСТОЯННОЙ СКОРОСТЬЮ В КАНАЛЕ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ГЕНЕРАТОРА

А. В. ГУБАРЕВ, В. П. КОВБАСЮК, С. А. МЕДИН, А. Е. ШЕЙНДЛИН, Б. Я. ШУМЯЦКИЙ

(*Москва*)

В одномерной постановке задачи проводится анализ режимов течения в канале магнитогидродинамического (МГД) генератора при условии постоянства скорости с учетом факторов, влияющих на изменение электрического к. п. д. и индукции магнитного поля по его длине.

Основные режимы течения в канале МГД-генератора к настоящему времени исследованы уже достаточно подробно. Течение несжимаемой жидкости в канале произвольного сечения и газа — в прямоугольном канале постоянного сечения рассматривалось в работе [1]. В [2] анализировалось течение в равномерно расширяющемся канале. Из работ, посвященных изотермическому течению газа в МГД-генераторе, можно отметить [3], а при условии постоянства скорости по длине — [4].

Выдвигая в качестве основного критерия эффективности генератора отношение перепада энтальпии, эквивалентного максимальной мощности в нагрузке, к начальной энтальпии потока, авторы допускают нечеткое изложение вопроса о влиянии электрического к. п. д. на термодинамическое совершенство процесса преобразования энергии. Поэтому особое внимание в представленной работе уделено выбору параметров, по которым целесообразно сравнивать различные типы генераторов, и анализу влияния режимов работы МГД-генератора на его внутренний к. п. д. Показано, что внутренний к. п. д. генератора определяется значением местного электрического к. п. д., и следовательно, для МГД-установки не безразлично, с каким электрическим к. п. д. работает генератор.

1. Рассмотрим установившееся [illegible] электропроводного газа с постоянной скоростью в трехмерном канале (фиг. 1). Газ поступает в канал (входное сечение δ_1, h_1) с начальными параметрами p_1, ρ_1, T_1 и движется с постоянной скоростью $u(x) = u_1$ вдоль оси x. Внешнее магнитное поле $B(x)$ направлено перпендикулярно к плоскости чертежа. При этом индуцированный ток будет протекать между электродами (вдоль оси y), к которым подключается внешняя нагрузка R. Расстояние между стенками канала, к которым примыкают полюсы магнита, обозначим через $\delta(x)$. При решении задачи приняты следующие допущения:

1) газ идеальный, невязкий и [illegible]. Течение в канале является квазиодномерным, т. е. все [illegible] зависит только от координаты x;

2) газ электрически нейтрален [illegible] вблизи электродов;

3) вторичное магнитное поле [illegible] по сравнению с внешним, т. е. магнитное число Рейнольдса R_m [illegible];

проводимость газа σ постоянна и изотропна.

Кроме того, принимаем, что разность потенциалов [illegible] электродах поддерживается ($\varphi = \varphi_+ - \varphi_- = \text{const}$) [1].

[1] Это, естественное для генератора со сплошными электродами и обязательное при включении секционированных электродов на общую нагрузку.

STAT

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

При этих допущениях уравнения, определяющие движение электропроводного газа в канале МГД-генератора [1], в безразмерном виде можно представить так:

$$\rho h\delta\,(1+\gamma M_1^2)^m = 1, \qquad (1+\gamma M_1^2)^{1/2}\,[(1-\eta_1)\sqrt{kM_1^2}]^{-1}\,dp = -jB\,dX$$

$$\eta_1(1-\eta_1)\,\frac{k-1}{k}\sqrt{kM_1^2}\,(1+\gamma M_1^2)^n j\delta\,dX = -d\tau, \qquad p = \rho\tau$$

$$(1-\eta_1)\,j = 1-\eta_1\eta, \quad \gamma = \frac{k-1}{2}, \quad m = \frac{1}{k-1}, \quad n = \frac{3-k}{2(k-1)} \qquad (1.1)$$

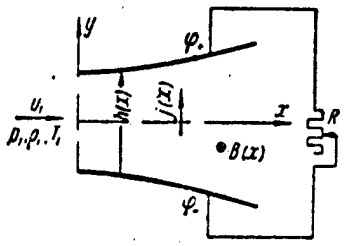
Здесь приняты следующие обозначения для безразмерных величин:

$$\delta \quad \frac{\delta(x)}{\delta_1}, \quad h = \frac{h(x)}{h_1}, \quad j = \frac{j(x)}{j_1}, \quad B = \frac{B(x)}{B_1}, \quad \rho = \frac{\rho(x)}{\rho_{01}}, \quad p = \frac{p(x)}{p_{01}}$$

$$\tau = \frac{T(x)}{T_{01}}, \quad X = \sigma_1 B_1^2 \sqrt{RT_{01}}\,\frac{x}{p_{01}}, \quad \eta = \frac{\eta(x)}{\eta_1}, \quad u = \frac{u(x)}{u_1} = 1$$

$$\sigma = \frac{\sigma(x)}{\sigma_1} = 1, \quad v = \frac{v(x)}{v_1} = 1$$

Здесь и в дальнейшем индексом 1 обозначены значения параметров на входе в канал, а индексом 0 — параметры торможения. Размерные значения параметров условимся записывать в виде функции от аргумента x.



Фиг. 1

Для облегчения анализа удобно ввести понятие местного электрического к. п. д., определяемого как отношение разности потенциалов на электродах к электродвижущей силе

$$\eta(x) = \frac{\varphi_1(x)-\varphi_2(x)}{u(x)B(x)} \quad \text{или} \quad \eta = \frac{1}{kB} \qquad (1.2)$$

Эта величина характеризует необратимые потери, связанные с джоулевым нагревом газа при прохождении тока.

Изменение индукции магнитного поля по длине канала генератора можно представить в функции величины магнитного зазора

$$B = [1 + a(\delta - 1)]^{-1} \qquad (1.3)$$

где a — постоянная, определяемая конкретной конструкцией магнита.

Так, например, если намагничивающая сила постоянна по длине, а сопротивление магнитопровода пренебрежимо мало ($\mu = \infty$), то $a = 1$. Для магнита, индукция которого постоянна по длине, $a = 0$. Формула также хорошо отражает случай, когда намагничивающая сила и магнитное сопротивление в стали постоянны и δ меняется не очень сильно.

Выписанная система уравнений не замкнута и для ее решения необходимо дополнительно задать один из параметров. Для простоты анализа можно принять этот параметр постоянным по длине канала. По-видимому, с практической точки зрения наибольший интерес представляет анализ течения при постоянном значении местного электрического к. п. д. ($\eta = 1$) и течения в канале с постоянным магнитным зазором ($\delta = 1$).

2. Оценку и сравнение различных режимов работы генераторов целесообразно проводить по следующим характеристикам.

Безразмерная длина генератора X. Эта величина определяет затраты мощности на создание магнитного поля, расход меди и стали, потери трения и тепловые потери через стенку.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

Внутренний к. п. д. генератора

$$\eta_{0i} = \frac{i_{01} - i_{02}}{i_{01} - i_{02}'} = \frac{T_{01} - T_{02}}{T_{01} - T_{02}'} \qquad (2.1)$$

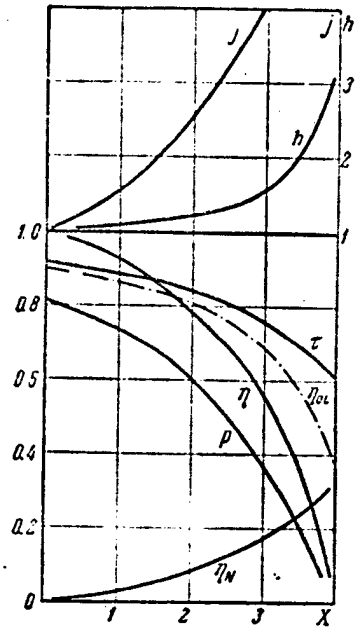
Здесь индекс 2 относится к параметрам на выходе, штрихом отмечены их значения при изэнтропическом расширении до давления торможения на выходе. Внутренний к. п. д. характеризует термодинамическое совершенство процесса преобразования энергии в канале.

Полезная мощность, отдаваемая во внешнюю цепь. Величина полезной мощности может быть получена интегрированием уравнения

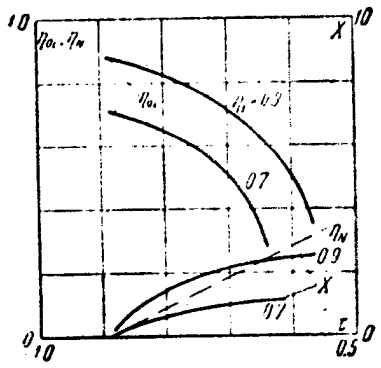
$$d\eta_N = \frac{dN}{mC_pT_{01}} = -d\tau = \eta_1(1-\eta_1)\frac{k-1}{k}\sqrt{k M_1^2}\,(1+\gamma M_1^2)^n j\delta\, dX \qquad (2.2)$$

Здесь η_N представляет собой долю от полной энтальпии газа на входе в канал, которая преобразуется в полезную электрическую мощность.

3. Рассмотрим генераторы с постоянным магнитным зазором ($u\delta$-генераторы). Из (1.3) следует, что $B = 1$ при $\delta = 1$. Следовательно, при условии постоянства магнитного зазора возможно создание по всей длине генератора максимальной технически достижимой индукции.



Фиг. 2



Фиг. 3

При $\delta = 1$ из приведенных выше уравнений нетрудно получить следующие зависимости:

$$\tau(1+\gamma M_1^2) = 1 + \frac{k-1}{k}\eta_1\left[p(1+\gamma M_1^2)^{\frac{k}{k-1}} - 1\right] \qquad (3.1)$$

$$(k-1)\left[p(1+\gamma M_1^2)^{\frac{k}{k-1}} - 1\right] + \frac{k^2}{\eta_1}\left(1-\eta_1\frac{k-1}{k}\right)\left\{\ln\left[1-\eta_1\frac{k-1}{k} + \eta_1 p M_1^2(1+\gamma M_1^2)^{\frac{k}{k-1}}\right] - \ln(1-\eta_1)\right\} = \sqrt{k M_1^2}\,(1+\gamma M_1^2)^q X \qquad (3.2)$$

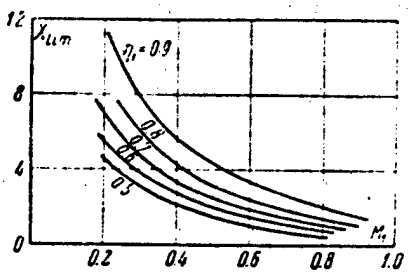
$$\eta_N(1+\gamma M_1^2) = \eta_1\frac{k-1}{k}\left[1 - p(1+\gamma M_1^2)^{\frac{k}{k-1}}\right], \quad \left(q = \frac{k+1}{2(k-1)}\right) \qquad (3.3)$$

STAT

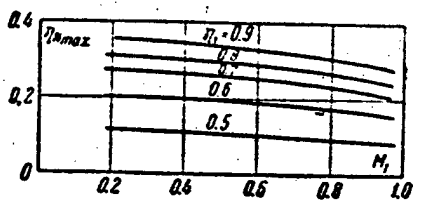
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

Анализ полученного решения показывает, что при $p = 0$, т. е. при полном срабатывании перепада давлений, располагаемый теплоперепад срабатывается неполностью ($\tau > 1$) и максимальная полезная мощность, которая может быть получена в $иб$-генераторе, прямо пропорциональна значению местного электрического



Фиг. 4



Фиг. 5

к. п. д. на входе в канал η_1. Так, для одноатомного газа ($k = 1.67$) при M_1 1.0 и $\eta_1 = 0.9$ только 27% тепловой мощности газа на входе в канал может быть преобразовано в электрическую энергию.

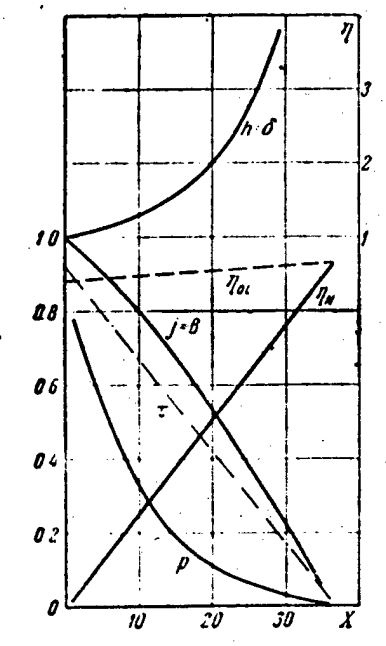
Внутренний к. п. д. такого генератора

$$\eta_{0i} = \eta_1 \frac{k-1}{k}\left[1 - p\,(1 + \gamma M_1^2)^{\frac{k}{k-1}}\right]\left[1 - p^{\frac{k}{k-1}}\,(1 + \gamma M_1^2)\right]^{-1} \qquad (3.4)$$

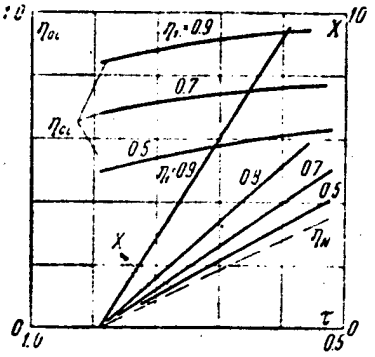
заметно снижается при увеличении вырабатываемой мощности генератора (с уменьшением p). При $p = 0$ (полном срабатывании давления)

$$\eta_{0i} = \eta_1 \frac{k-1}{k} < \eta_1$$

т. е. оказывается значительно меньшим, чем величина местного электрического к. п. д. на входе в канал. Таким образом, при достаточно больших значениях вырабатываемой полезной мощности η_N внутренний к. п. д.



Фиг. 6



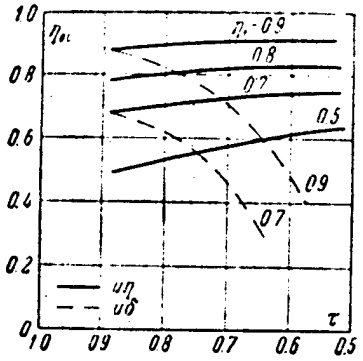
Фиг. 7

$иб$-генератора оказывается весьма низким. Причина этого обусловлена существенным уменьшением местного электрического к. п. д. по длине канала.

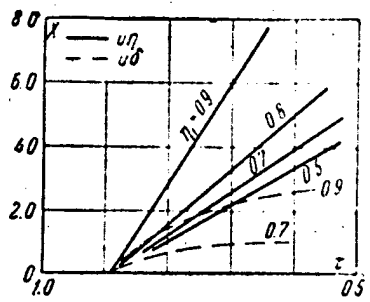
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

Для иллюстрации на фиг. 2 приведены расчетные кривые изменения параметров потока и характеристик $u\delta$-генератора в зависимости от длины его канала X ($k = 1.67$, $M_1 = 0.5$, $\eta_1 = 0.9$). Влияние местного электрического к. п. д. η_1 на характеристики $u\delta$-генератора показано



Фиг. 8



Фиг. 9

на фиг. 3. На фиг. 4 и 5 приведены кривые изменения предельной длины канала $X_{\lim}$ и его мощности $\eta_{N\max}$ при полном срабатывании располагаемого давления.

4. Генераторы с постоянным значением местного электрического к. п. д. ($u\eta$-генераторы). Из приведенного выше анализа следует, что столь существенное снижение внутреннего к. п. д. МГД-генератора при постоянстве магнитного зазора (при $\delta = 1$) с увеличением вырабатываемой мощности обусловлено значительным уменьшением местного электрического к. п. д. по длине канала. Следовательно, для повышения внутреннего к. п. д. η_{0i} при больших значениях η_N необходимо проектировать канал таким образом, чтобы местное значение электрического к. п. д. $\eta(x)$ по всей длине сохранялось достаточно высоким. В простейшем случае можно принять $\eta(x) = \text{const}$, т. е. $\eta = 1$. При этом допущении $j = B = 1/h$, и решение системы уравнений может быть получено в следующем виде:

$$\tau(1 + \gamma M_1^2)^{1-\eta_1} = p^{\eta_1 \cdot \frac{k-1}{k}} \qquad (4.1)$$

$$\eta_N = \frac{1}{1 + \gamma M_1^2} - \tau \qquad (4.2)$$

$$\eta_{0i} = \tau[1 - \tau(1 + \gamma M_1^2)]\left[1 + \gamma M_1^2 - p^{\frac{k-1}{k}}(\tau + \tau\gamma M_1^2 + \gamma M_1^2)^{-1}\right]^{-1} \qquad (4.3)$$

Анализ решения показывает, что в $u\eta$-генераторе вырабатываемая мощность и внутренний к. п. д. при одинаковых условиях оказываются значительно бо́льшими, чем в $u\delta$-генераторе.

Для определения длины канала необходимо задать значение a. При $\mu = \infty$ имеем $a = 1$ и $h = \delta$. Тогда получим

$$X_{\lim} = \frac{k}{k-1}[1 - \tau(1 - \gamma M_1^2)][\eta_1(1 - \eta_1)]\sqrt{k M_1^2(1 - \gamma M_1^2)^{-1}}]^{-1} \qquad (4.4)$$

STAT

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

На фиг. 6 и 7 показаны основные расчетные зависимости для $u\eta$-генератора при $a = 1$. Отсюда видно, что внутренний к. п. д. такого генератора несколько возрастает с увеличением его длины и, следовательно, с увеличением вырабатываемой мощности.

Следует отметить, что в $u\eta$-генераторе при $a = 1$ по длине канала возрастают как расстояние между электродами, так и магнитный зазор. Индукция магнитного поля по длине канала уменьшается. При $a = 0$ расстояние между электродами остается постоянным ($h = 1$), а магнитный зазор возрастает. В этом случае $B = 1$ (индукция в зазоре постоянна), и длина канала оказывается меньшей, чем в случае $a = 1$.

$$X_{a=0} = \eta_1 \frac{k-1}{k} X_{a=1} < X_{a=1}$$

Учитывая, что обычно $1 > a > 0$, имеем

$$X_{a=0} < X < X_{a=1}$$

На фиг. 8 и 9 дано сравнение характеристик $u\eta$- и $u\delta$-генераторов при $M_1 = 0.6$. Видно, что при заданном внутреннем к. п. д. преобразования длина канала $u\delta$-генератора оказывается меньшей. Однако при достаточно больших используемых теплоперепадах в $u\delta$-генераторе невозможно получение приемлемых значений внутреннего к. п. д. Следовательно, для установок с достаточно большим коэффициентом преобразования энергии потока в электрическую целесообразно проектировать канал с увеличивающимся магнитным зазором.

Поступило 3. VI. 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Нейринтер. Оптимальная генерация мощности движущейся плазмой. Сб. переводов «Движущаяся плазма», ИЛ, 1961
2. Киселев М. И. К теории магнитогидродинамического генератора. Вести. МГУ, 1962.
3. Сарычев В. М. Преобразование кинетической энергии стационарного потока плазмы в электрическую при изотермическом торможении его в поперечном магнитном поле, ПМТФ, 1962, № 2.
4. Rosa R. J. Physical principles of magnetohydrodynamic power generation. Phys. Fluids, 1961, № 2.

STAT

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

ИЗВЕСТИЯ АКАДЕМИИ НАУК СССР, ОТН
ЭНЕРГЕТИКА И АВТОМАТИКА

№ 6 1962

К ВОПРОСУ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ МГД-ГЕНЕРАТОРОВ

А. Е. ШЕЙНДЛИН, А. В. ГУБАРЕВ, В. Н. КОВБАСЮК, В. А. ПРОКУДИН

(Москва)

Исследуется задача нахождения оптимального режима течения в канале МГД-генератора, обеспечивающего максимальный съем мощности на единице длины канала или в единице его объема.

Показано, что при любой зависимости проводимости газа от температуры и давления и заданном внутреннем к. п. д. МГД-генератора можно найти оптимальную скорость потока и оптимальную зависимость местного электрического к. п. д. от температуры, обеспечивающие минимальную длину или минимальный объем канала.

Вопрос о выборе геометрии канала и режима течения, обеспечивающих наиболее выгодные условия работы (максимальный энергосъем, минимальные габариты устройства) является центральным при проектировании крупных магнитогидродинамических генераторов. Трудности проблемы обусловлены невозможностью оценки влияния всех факторов на характер процессов отбора мощности от потока ионизированного газа и эффективность генератора в целом. Как правило, оценке поддаются лишь простейшие типы генераторов, для которых считаются заданными либо характеристики потока, либо конфигурация канала, а также параметры электрической нагрузки и распределение магнитного поля. Возможно и иное задание параметров, однако любая оптимизация в рамках сделанных предположений будет носить частный характер. Примером может служить работа Нейрингера [1], в которой рассматривается влияние распределенной электрической нагрузки и числа M на входе в канал на отдачу максимальной мощности в генераторе постоянного (прямоугольного) сечения при постоянных проводимости газа и индукции магнитного поля. В режиме максимального энергосъема внутренний к.п.д. такого генератора оказывается неудовлетворительно малым (~ 0.5), причем и возможное срабатывание энтальпии оказывается ограниченным. Более общим следует рассматривать замечание [2] о выборе скорости на входе в генератор такой, чтобы с учетом реальной зависимости проводимости газа от температуры произведение σu^2 было максимальным. Однако полного ответа на вопрос о том, каким в целом должен быть режим работы генератора, автор [2] не дает.

В самом общем случае оптимизация режима работы элементарного участка канала МГД-генератора, на котором срабатывается малый температурный перепад ΔT_i, может служить основой для нахождения оптимального режима работы генератора в целом, если представить канал как совокупность таких элементов, причем на полной длине канала срабатывается теплоперепад $T_{01} - T_{0n} = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta T_i$

Предполагается квазиодномерная постановка задачи о течении без трения и теплоотвода. Следует ожидать, что реальные потери в канале

STAT

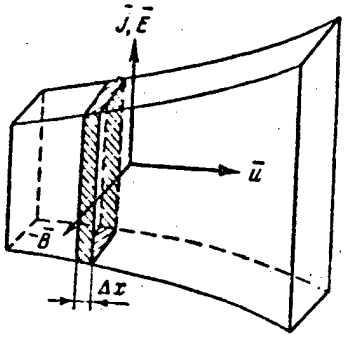
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

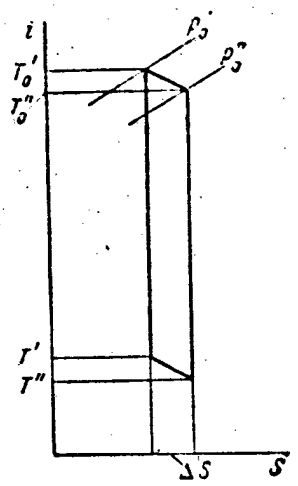
генератора большой мощности при электрическом к.п.д.[1] 0.7 — 0.9 будут определяться в основном рассеянием джоулева тепла.

Схема процесса отбора энергии на элементарном участке канала Δx (см. фиг. 1) просто изображается в координатах $i - s$ диаграммы (фиг. 2). T' и T'' — статические температуры в потоке на границах Δx, T_0' и T_0'' — соответствующие температуры торможения. Энергия, вырабатываемая на элементе Δx пропорциональна $c_p(T_0' - T_0'')$. Изменение энтропии на Δx можно записать через электрический к. п. д. η

$$\Delta s = \frac{c_p(T_0' - T_0'')}{T''} \frac{1-\eta}{\eta} \qquad (1)$$



Фиг. 1.



Фиг. 2.

либо через внутренний к. п. д. η_{oi} на участке

$$\Delta s = \frac{c_p(T_0' - T_0'')}{T_0'} \frac{1-\eta_{oi}}{\eta_{oi}} \qquad (2)$$

Из выражений (1) и (2) выводится соотношение между η и η_{oi}

$$\eta = \frac{\eta_{oi}}{\frac{T}{T_0} + \frac{T_0 - T}{T_0}\eta_{oi}} \qquad (3)$$

Зависимость полезной электрической мощности от параметров потока и режима генератора на Δx определяется как

$$\Delta N = jE\eta S\Delta x = u^2B^2\eta(1-\eta)\sigma(T, p)S\Delta x \qquad (4)$$

$E = uB$ — напряженность электрического поля на холостом ходу; $S = \frac{m}{\rho u}$ — сечение канала МГД-генератора; m — расход массы; B — индукция магнитного поля; u — скорость потока; ρ — плотность (массы); σ — проводимость. Удельная мощность, вырабатываемая 1 *кг* газа на Δx, равна соответственно

$$\Delta N_m = \frac{\Delta N}{m} = \frac{uB^2\eta(1-\eta)\sigma(T, p)\Delta x}{\rho} \qquad (5)$$

Для низкотемпературной плазмы, проводимость которой практически не зависит от электрон-ионных соударений в газе, оказывается верным приближенное соотношение

$$\sigma(T, p) \cong \sigma(T, p^*)\sqrt{\frac{p^*}{p}} \qquad (6)$$

учитывающее влияние давления на проводимость газа.

[1] Электрический к. п. д. η определяется как отношение электрической мощности, отводимой с элемента длины генератора, к суммарной мощности, выделяемой в нагрузке и в плазме.

STAT

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

Для дальнейшего удобно, полагая газ идеальным, выразить параметры в потоке через параметры торможения

$$u = \sqrt{2C_p (T_0 - T)} \tag{7}$$

$$\rho = \rho_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{1}{k-1}} \tag{8}$$

$$p = p_0 \left(\frac{T}{T_0}\right)^{\frac{k}{k-1}} \tag{9}$$

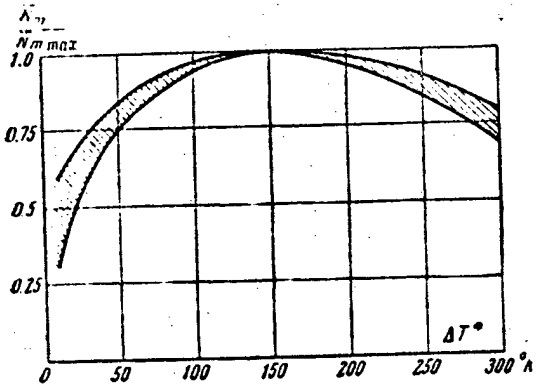
Подстановка (3, 6—9) в (5) приводит к выражению для удельной мощности с единицы массы газа на единичной длине канала

$$\overline{N}_m = \frac{\sqrt{2C_p} B^2 \eta_{0i} (1 - \eta_{0i})}{\rho_0} \sqrt{\frac{p^*}{p_0}} \times \frac{\sqrt{\Delta T^*} \sigma (T_0 - \Delta T^*, p^*)}{\left[1 + (2\eta_{0i} - 1)\frac{\Delta T^*}{T_0} + \frac{\Delta T^{*2}}{T_0 (T_0 - \Delta T^*)}\right]\left(1 - \frac{\Delta T^*}{T_0}\right)^{\frac{2+k}{2(k-1)}}} \tag{10}$$

где $\Delta T^* = T_0 - T$ — перепад температур, характеризующий скорость потока; p^* — давление, для которого известна зависимость проводимости от температуры.

Для потока, имеющего на входе элемента заданные параметры торможения T_0, p_0, ρ_0 при заданном внутреннем (термодинамическом) к. п. д. η_{0i} работы участка, существует оптимальная скорость течения в канале, равная $\sqrt{2C_p \Delta T^*}$, причем величина ΔT^* выбирается из условия максимума выражения (10)

$$\frac{\partial (\overline{N}_m)}{\partial (\Delta T^*)} = 0$$



Фиг. 3.

Оптимальное значение ΔT^* для каждого конкретного значения температуры торможения T_0 и внутреннего к. п. д. η_{0i} просто определяется численным подсчетом. Фиг. 3 иллюстрирует результаты расчетов оптимального значения ΔT^* для ряда газов в диапазоне температур торможения 2700—1700° К при η_{0i} = 0.7—0.9. Данные по проводимости газа заимствованы из [3]. Кривые зависимости относительной удельной мощности $\overline{N}_m/\overline{N}_{m\max}$ от ΔT^* в указанном диапазоне температур и к. п. д. η_{0i} лежат внутри заштрихованных секторов. Оптимальное значение $\Delta T^* \cong 150°$ К.

Постоянство оптимальной скорости для каждого газа в указанном температурном диапазоне обусловлено почти линейной зависимостью логарифма проводимости от температуры. Следует ожидать, что с ростом рабочих температур в области менее сильной зависимости проводимости от температуры скорость потока должна возрасти.

Скорость потока, выбранная из условия максимальной отдачи мощности на элементе длины единицей массы газа, обеспечивает минимальную длину элемента канала магнитогидродинамического генератора. Для

STAT
Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

оптимазации по объему можно, по аналогии с предыдущим, проанализировать выражение мощности, вырабатываемой в единице объема канала генератора

$$\overline{N}_v = \frac{\Delta N}{S\Delta x} = u^2 B^2 \eta (1-\eta) \sigma (T, p) \qquad (11)$$

Подстановка (3, 6, 7, 9) в (11) дает

$$\overline{N}_v = 2C_p B^2 \eta_{oi} (1-\eta_{oi}) \sqrt{\frac{p^*}{p_0}} \times$$

$$\times \frac{\Delta T^* \sigma (T_0 - \Delta T^*, p^*)}{\left[1 + (2\eta_{oi} - 1)\frac{\Delta T^*}{T_0} + \frac{\Delta T^{*2}}{T_0 (T_0 - \Delta T^*)}\right]\left(1 - \frac{\Delta T^*}{T_0}\right)^{\frac{k}{2(k-1)}}} \qquad (12)$$

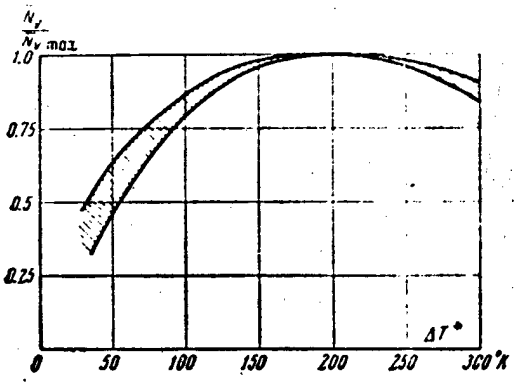
Результаты расчета $\frac{\overline{N}_v}{\overline{N}_{v\,max}}$ в том же интервале температур и к. п. д. η_{oi} представлены на фиг. 4. Оптимальное значение ΔT^* вблизи 200°К. Сопоставляя графики фиг. 3 и 4 и учитывая пологую зависимость относительной удельной мощности от ΔT^* вблизи максимума, можно рекомендовать $\Delta T^* \simeq 200°$ К. При этом и объем элемента канала и его длина практически оказываются минимальными.

Учитывая замечание, сделанное в начале статьи, о том, что канал можно представить как сумму элементов, на каждом из которых срабатывается элементарный теплоперепад ΔT_i, при любой заданной зависимости местного внутреннего к. п. д. η_{io} от температуры торможения, следует считать общую длину канала как сумму длин элементов, и если длина каждого участка

$$\Delta x_{i\,min} = \frac{C_p \Delta T_i}{\overline{N}_{m\,max}(T_0, \eta_{oi})} \qquad (13)$$

минимальна, то относительно минимальной будет и общая длина канала генератора

$$L = -\int_{T_{oi}}^{T_{on}} C_p \frac{dT_0}{\overline{N}_{m\,max}(T_0, \eta_{oi})} \qquad (14)$$



Фиг. 4.

Вопрос о том, какой должна быть оптимальная функция распределения местного внутреннего к. п. д. η_{oi} от температуры торможения T_0 при заданном общем внутреннем к. п. д. η_{oi}^* генератора, представляет собой самостоятельную вариационную задачу. Предлагается следующая постановка задачи нахождения оптимального распределения η_{oi} от T_0.

Выражение для местного внутреннего к. п. д. элемента канала генератора (см. фиг. 2) записывается в виде

$$\eta_{oi} = \frac{T_0' - T_0^*}{T_0' \left[1 - \left(\frac{p_0^*}{p_0'}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]} \qquad (15)$$

STAT

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9

откуда

$$\frac{p_0^*}{p_0'} = \left(1 - \frac{\Delta T_i}{T_0' \eta_{0i}}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

или

$$\ln \frac{p_0^*}{p_0'} = \frac{k}{k-1} \ln \left(1 - \frac{\Delta T_i}{T_0' \eta_{0i}}\right)$$

Совершая предельный переход при $\Delta T_i \to 0$, принимая во внимание противоположное направление отсчета ΔT_i и dT_0, заменяя $\ln(1-\alpha) = -\alpha$ при $\alpha \to 0$, получаем

$$\frac{k-1}{k} \ln \frac{p_{0n}}{p_{01}} = \int_{T_{01}}^{T_{0n}} \frac{dT_0}{\eta_{0i} T_0} \tag{16}$$

или

$$\frac{p_{0n}}{p_{01}} = \exp\left\{\frac{k}{k-1} \int_{T_{01}}^{T_{0n}} \frac{dT_0}{\eta_{0i} T_0}\right\} \tag{17}$$

В соответствии с выражением (15), после подстановки (17), можно представить полный внутренний к. п. д. η_{0i}^* генератора как

$$\eta_{0i}^* = \frac{T_{01} - T_{0n}}{T_{01}\left\{1 - \exp\left[\int_{T_{01}}^{T_{0n}} \frac{dT_0}{\eta_{0i} T_0}\right]\right\}} \tag{18}$$

Окончательно задача ставится так: при заданном внутреннем к. п. д. η_{0i}^* генератора, определяемом равенством (18), требуется найти такую зависимость η_{0i} от T_0, при которой длина канала генератора, связанная с η_{0i} соотношением (14), будет минимальной.

Поступило 3 VII 1962

ЛИТЕРАТУРА

1. Нейрингер. Оптимальная генерация мощности движущейся плазмой. Сб. Движущаяся плазма, ИЛ, 1961.
2. Rosa R. J. Physical principles of magnetohydrodynamic power generation. The Physics of Fluids, February, 1961.
3. Frost L. S. Conductivity of seeded atmospheric pressure plasmas. J. App. Phys. 1961, 32, № 10.

Declassified in Part - Sanitized Copy Approved for Release 2014/05/30 : CIA-RDP80T00246A075600300001-9